

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①⑪ N° de publication : 2 793 598

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : 99 06239

⑤① Int Cl⁷ : H 01 F 7/18, H 02 M 3/137, 7/515

①②

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 12.05.99.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 17.11.00 Bulletin 00/46.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦① Demandeur(s) : CEDRAT RECHERCHE Société ano-
nyme — FR.

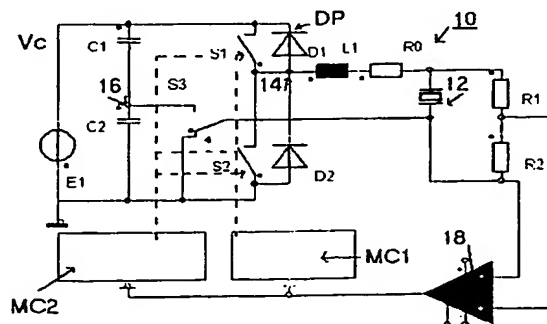
⑦② Inventeur(s) : DEBARNOT MIGUEL, LE LETTY
RONAN et CLAEYSSSEN FRANCK.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HECKE.

⑤④ DISPOSITIF ELECTRONIQUE PERMETTANT L'ALIMENTATION ET LE CONTROLE D'ACTIONNEURS
PIEZOELECTRIQUES.

⑤⑦ Un dispositif d'alimentation d'un actionneur piézoélec-
trique 12 comprend une source de tension E1 continue bidi-
rectionnelle associée à un diviseur capacitif, et à un demi-
pont DP de puissance formé par deux interrupteurs S₁, S₂
commandés, pilotés alternativement par deux moyens de
contrôle MC1, MC2 autorisant deux modes de fonctionne-
ment distincts. Le premier moyen de contrôle MC1 est des-
tiné à fournir une tension continue ou quasistatique et
régulée à l'actionneur 12. Le second moyen de contrôle
MC2 est susceptible de délivrer une tension sinusoïdale à
l'actionneur 12 avec une fréquence proche de la fréquence
de résonance. Un sélecteur S₃ peut connecter respective-
ment l'actionneur piézoélectrique 12 à la masse de la sou-
rce E1 ou au point milieu de demi-pont DP dans l'un ou l'autre
mode de fonctionnement.



FR 2 793 598 - A1



5 **DISPOSITIF ELECTRONIQUE PERMETTANT L'ALIMENTATION ET LE
CONTROLE D'ACTIONNEURS PIEZOELECTRIQUES**

10

Domaine technique de l'invention

La présente invention concerne un dispositif électronique permettant
l'alimentation et le contrôle d'un actionneur piézoélectrique à l'aide d'une
15 tension continue ou quasistatique, ou d'une tension sinusoïdale de fréquence
voisine de la fréquence de résonance, ledit dispositif comprenant :

- une première source de tension continue bidirectionnelle connectée à
deux condensateurs formant un diviseur capacitif,
- un demi - pont de puissance formé par deux interrupteurs commandés,
20 associées à deux diodes de roue libre,
- un circuit de charge alimenté par ledit demi-pont, et comprenant une
inductance connectée électriquement avec l'actionneur,
- et un moyen de lecture de l'état de l'actionneur piézoélectrique.

25

Description de l'art antérieur

Les actionneurs piézoélectriques possèdent une résolution de
30 positionnement intrinsèquement infinie, leur course étant proportionnelle à leur
tension d'alimentation. Ils peuvent être alimentés par un amplificateur linéaire
de précision, mais celui-ci ne possède pas un bon rendement. Les actionneurs
piézoélectriques peuvent aussi être alimentés par une alimentation à
découpage telle que décrite dans le brevet US-A- 4,258,282. On utilise le fait

5 que l'actionneur piézoélectrique est de nature capacitive, avec possibilité de maintenir une charge à ses bornes, lorsqu'il est alimenté par des impulsions de courant. Le courant circulant dans l'actionneur est ainsi piloté par la fréquence de récurrence des commutations.

10 Le document US-A- 4,258,282 utilise un transformateur pour générer une tension de commande aux bornes d'un actionneur piézoélectrique.

15 Stiebel et al. ont présenté dans l'article intitulé 'New approach to a switching amplifier for piezoelectric actuators', Actuator 98 Conference, un moyen de contrôle d'une alimentation électronique à découpage. Le moyen de contrôle est basé sur la connaissance préalable de l'impédance à alimenter, et sur des calculs de courant circulant dans la charge. Pour assurer une bonne régulation, il est nécessaire que l'impédance à alimenter soit connue précisément, ce qui oblige à placer en parallèle avec l'actionneur, une capacité
20 du même ordre de grandeur que celle de l'actionneur. Compte - tenu des capacités importantes présentées par les céramiques multicouches, une telle capacité présente un encombrement important.

25 Par ailleurs, les actionneurs piézoélectriques possèdent un bon rendement lorsqu'ils sont alimentés à la résonance. De nombreux onduleurs ont été proposés pour réaliser cette alimentation. Cependant, en raison de la tension relativement élevée nécessaire pour alimenter les actionneurs piézoélectriques, la grande majorité de ces onduleurs utilise un transformateur élévateur de tension, qui est encombrant. Ainsi, une alimentation destinée à un
30 moteur piézoélectrique, telle que celle décrite dans le brevet N° US 5,130,619, comprend deux phases, et nécessite donc deux transformateurs.

La fréquence de résonance du dispositif varie généralement en fonction de la charge ou bien des conditions d'environnement telle que la température.

5 L'onduleur est donc généralement piloté en fréquence par un moyen de suivi de cette fréquence de résonance, par exemple une boucle à verrouillage de phase décrite dans le document US-A- 4,275,363. Cette boucle à verrouillage de phase utilise généralement la phase relative entre le courant et la tension de l'actionneur.

10

Enfin, certains dispositifs comme des moteurs piézoélectriques décrits notamment dans le document FR-A-2750 543, peuvent être alimentés à la résonance et en statique, de façon à obtenir une précision de positionnement particulièrement élevée. Le document EP-A-313 072 décrit également un

15 principe de commande d'un moteur piézoélectrique comportant deux alimentations distinctes, dans lesquelles la première alimentation fonctionne à la résonance de l'actionneur, et la seconde fonctionne en statique. Un inconvénient majeur de ce principe résulte du fait que ces deux alimentations nécessitent deux étages de puissance distincts, ce qui est coûteux.

20

Objet de l'invention

L'objet de l'invention consiste à réaliser un dispositif d'alimentation électronique possédant un bon rendement, et capable d'alimenter un actionneur

25 piézoélectrique soit avec une tension d'alimentation continue ou quasistatique, soit avec une tension sinusoïdale de fréquence voisine de la fréquence de résonance, permettant ainsi d'éviter l'emploi d'étages de puissance distincts pour effectuer les deux types d'alimentation désirées.

30

Le dispositif selon l'invention comprend une source de tension continue bidirectionnelle dont le niveau peut être contrôlé, deux condensateurs permettant d'une part de former un diviseur capacitif pour un fonctionnement en

5 onduleur, et d'autre part de servir de réservoir d'énergie à une alimentation de
contrôle, deux interrupteurs agencés en demi - pont permettant l'alimentation
d'une charge constituée d'une inductance et d'une résistance en liaison série
avec l'actionneur piézoélectrique, un premier moyen de contrôle agissant sur
les interrupteurs et permettant l'obtention d'une bonne précision de la tension
10 aux bornes de l'actionneur piézoélectrique, un second moyen de contrôle des
interrupteurs par des signaux PWM de modulation de largeur d'impulsions,
dans laquelle la fréquence de fonctionnement est proche de la fréquence de
résonance de l'actionneur, et une boucle à verrouillage de phase comparant les
phases respectives d'une tension sinusoïdale de référence et de la tension
15 apparaissant aux bornes de l'actionneur.

Selon une caractéristique de l'invention, le premier moyen de contrôle
comporte :

- 20 - un amplificateur différentiel délivrant un signal d'erreur entre un signal de
consigne délivré par un circuit de référence, et un signal de mesure
représentatif de la tension de l'actionneur,
- un convertisseur tension-fréquence et un moyen de détection du signe de
l'erreur autorisant l'activation de deux bascules monostables
commandant respectivement les interrupteurs de charge et de décharge,
- 25 - et un moyen permettant de régler la largeur des signaux de sortie des
bascules monostables en fonction de la tension aux bornes de
l'actionneur de façon à linéariser le processus de commutation des
charges.

30 Le premier moyen de contrôle repose sur la nature capacitive de
l'actionneur piézoélectrique, qui est capable de maintenir une tension à ses
bornes sans qu'il soit toujours nécessairement alimenté. Ainsi, il est possible de
commuter une charge électrique à l'actionneur pendant un instant bref, appelé
période de commutation en fermant le premier interrupteur du bras de pont. De

5 la même façon, il est possible de décharger l'actionneur en fermant le deuxième interrupteur. En répétant cette opération de commutation, on peut ainsi charger ou décharger l'actionneur. La fréquence avec laquelle cette opération est répétée, permet de contrôler le courant moyen circulant dans l'actionneur. Il est donc possible d'utiliser la fréquence de récurrence de ces commutations
10 comme variable de régulation de la tension aux bornes de l'actionneur.

Selon une autre caractéristique de l'invention, le second moyen de contrôle comporte :

- 15 - un circuit d'échantillonnage délivrant un signal d'échantillonnage à haute fréquence,
- un comparateur comparant les signaux issus du circuit d'échantillonnage et d'un convertisseur tension/fréquence connecté à la sortie d'un sommateur,
- 20 - et une boucle à verrouillage de phase semi - numérique utilisant le signal sinusoïdal de référence issu du convertisseur tension/fréquence, et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur piézoélectrique.

Le second moyen de contrôle est destiné à piloter les interrupteurs de l'étage de puissance de manière à fournir à l'actionneur, une tension
25 sinusoïdale de fréquence proche de la fréquence de résonance mécanique. En présence d'un régime sinusoïdal dans la charge, une différence de phase s'établit entre la commande et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur piézoélectrique, à cause de l'inductance connectée en série. Par ailleurs, l'impédance électrique de l'actionneur est fortement modifiée au
30 voisinage de la résonance, si bien que la différence de phase entre la commande et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur s'en trouve également affectée. Il est donc possible d'utiliser cette information pour rechercher la résonance mécanique de l'actionneur au moyen d'une boucle à

- 5 verrouillage de phase, sans devoir faire une mesure de courant, comme cela se fait généralement.

Description sommaire des dessins

10

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de différents modes de réalisation donnés à titre d'exemples non limitatifs, et représentés aux figures annexées dans lesquelles :

- 15 - la figure 1 est un synoptique du circuit d'alimentation de l'actionneur piézoélectrique à l'aide de deux moyens de contrôle distincts,
- la figure 2 représente le circuit synoptique du premier moyen de contrôle 1,
- 20 - les figures 3a - 3d sont des circuits électriques expliquant le transfert d'énergie dans la charge lorsque les interrupteurs sont pilotés par le premier moyen de contrôle,
- les figures 4a et 4b sont des diagrammes temporels illustrant le transfert d'énergie dans la charge lorsque les interrupteurs sont pilotés par le premier
- 25 moyen de contrôle,
- la figure 5 montre un diagramme exprimant la relation entre la durée de la commutation et la différence de potentiel entre le réservoir d'énergie et
- 30 l'actionneur lors du processus de charge de l'actionneur,
- la figure 6 représente un diagramme exprimant la relation entre la durée de la commutation et la différence de potentiel entre l'actionneur et la masse électrique lors du processus de décharge de l'actionneur,

5

- la figure 7 est une variante du circuit de la figure 1, dans laquelle les éléments L_1 et R_0 sont agencés différemment pour obtenir une autre caractéristique de fonctionnement quasistatique,

10 - la figure 8 est une autre variante du circuit de la figure 1, dans laquelle le demi-pont est connecté à un potentiel négatif pour obtenir une autre caractéristique de fonctionnement quasistatique ;

- la figure 9 est le circuit synoptique d'une variante du premier moyen de
15 contrôle de la figure 2 ;

- la figure 10 montre un circuit synoptique du deuxième moyen de contrôle du dispositif selon l'invention ;

20 - la figure 11 est le circuit synoptique d'une variante du deuxième moyen de contrôle de la figure 10 ;

- la figure 12 est un diagramme exprimant la relation de phase utilisée par le deuxième moyen de contrôle entre la sinusoïde de référence et la sinusoïde de
25 tension apparaissant aux bornes de l'actionneur, en fonction de la valeur de l'inductance placée en série avec l'actionneur.

DESCRIPTION DES SOLUTIONS PREFEREES

30

En référence à la figure 1, un dispositif de commande 10 électronique d'un actionneur 12 piézoélectrique, comprend une source d'alimentation E1 de tension continue bidirectionnelle V_c , et deux condensateurs de puissance C_1 et C_2 constituant un diviseur capacitif connecté en parallèle aux bornes de la

5 source d'alimentation E1. Le diviseur capacitif est branché d'autre part à un demi-pont DP de puissance formé par deux interrupteurs S_1 , S_2 , et deux diodes de roue libre D_1 , D_2 . Une charge, constituée par une inductance L_1 placée en série avec l'actionneur 12 piézoélectrique, est connectée entre le point milieu 14 du demi - pont DP et le point milieu 16 du diviseur capacitif.

10

Les deux interrupteurs S_1 , S_2 du demi-pont DP sont formés à titre d'exemples par des transistors MOSFET ou IGBT, mais il est clair que d'autres composants de puissance peuvent être utilisés.

15 Des moyens de lecture de l'état de l'actionneur 12 piézoélectrique comporte un diviseur résistif R_1 , R_2 et un amplificateur opérationnel 18 destiné à délivrer un signal de mesure représentatif de la tension aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique. Un sélecteur S_3 est en liaison avec le point milieu 16 du diviseur capacitif, et permet le passage d'un mode de
20 fonctionnement à l'autre .

Le sélecteur S_3 est susceptible de piloter la charge de deux façons distinctes et complémentaires à l'aide de deux moyens de contrôle MC1 et MC2, de manière à fournir à l'actionneur 12 piézoélectrique une tension
25 continue ou quasistatique, ou bien une tension alternative proche de la fréquence de résonance de l'actionneur. Les deux moyens de contrôle MC1 et MC2 reçoivent le signal de mesure issu de l'amplificateur opérationnel 18, et coopèrent avec le sélecteur S_3 et les interrupteurs S_1 , S_2 . Les deux types de fonctionnement sont par exemple utilisés dans certains moteurs
30 piézoélectriques pour obtenir une précision de positionnement élevée.

En référence à la figure 2, le premier moyen de contrôle MC1 comprend un amplificateur différentiel 22 effectuant la différence entre un signal de consigne délivré par un circuit de référence 24, et le signal de mesure issu de

- 5 l'amplificateur opérationnel 18. La sortie de l'amplificateur différentiel 22 fournit un signal d'erreur injecté dans un contrôleur 26, formé à titre d'exemple par un régulateur Proportionnel - Intégral.

Les deux interrupteurs S_1 et S_2 sont respectivement commandés par des
10 bascules monostables MM_1 et MM_2 permettant la charge ou la décharge de l'actionneur 12. A chaque commutation, une charge q_c est transférée pour la charge entre le réservoir du condensateur C_1 et la capacité de l'actionneur 12, ou bien une charge q_d est transférée pour la décharge entre la capacité de l'actionneur 12 et la masse électrique.

15

Les bascules monostables MM_1 et MM_2 sont déclenchées par deux signaux de commande, à savoir :

- un premier signal (en) délivré par un circuit de détection de signe 28 pour activer soit la charge, soit la décharge ;
- 20 - un second signal T fourni par un convertisseur tension - fréquence VFC.

Chaque bascule monostable MM_1 et MM_2 est contrôlée par un signal D issu de moyens de correction VC1 et VC2, lesquels agissent respectivement sur la
25 durée des commutations de charge et de décharge. Un circuit inverseur N interdit l'activation simultanée des deux bascules monostables MM_1 et MM_2 .

Ainsi, en intégrant sur le temps, le courant fourni à la charge est proportionnel à la fréquence générée par le convertisseur tension – fréquence
30 VFC, et la vitesse de l'actionneur 12 est régulée par le contrôleur 26.

L'actionneur 12 piézoélectrique présente en statique, aux pertes diélectriques près, une charge purement capacitive, capable de maintenir une tension à ses bornes entre deux commutations. Si les temps de commutation

- 5 sont de l'ordre de la micro seconde, l'actionneur 12 n'a pas le temps de se déplacer durant cette commutation, en raison de son inertie propre.

Dans le mode de fonctionnement en statique, le sélecteur S_3 est dans une première position pour connecter la capacité de l'actionneur 12, et
10 l'inductance L_1 à la masse. En référence à la figure 3.a, un courant circule pour charger la capacité de l'actionneur 12 dès que le premier interrupteur S_1 est fermé. A l'ouverture de S_1 , le courant continue de circuler dans l'actionneur 12 par l'intermédiaire de la diode de roue libre D_2 , de manière à démagnétiser l'inductance L_1 , comme illustré sur la figure 3.b. Il en résulte une augmentation
15 de la tension aux bornes de l'actionneur 12, illustrée sur la figure 4.a, et consécutive à l'activation de la bascule monostable MM_1 .

En référence à la figure 3.c, un courant circule pour décharger la capacité de l'actionneur 12, dès que l'interrupteur S_2 est fermé. A l'ouverture de
20 S_2 , la coupure du courant circulant dans l'inductance L_1 provoque un effet survolteur, qui permet au courant de circuler à travers la diode de roue libre D_1 , tel que montré sur la figure 3.d. Cet effet permet une récupération d'énergie dans les condensateurs C_1 et C_2 . Cette commutation de décharge entraîne une diminution de la tension aux bornes de l'actionneur 12, illustrée sur la figure 4.b,
25 et consécutive à l'activation de la bascule monostable MM_2 . La récupération d'énergie permet d'augmenter le rendement du dispositif, ce qui est particulièrement appréciable lorsqu'il s'agit d'alimenter de fortes capacités.

Le courant maximal circulant dans les interrupteurs S_1 et S_2 est limité par
30 la durée de la commutation, qui reste faible devant la période propre du circuit oscillant présenté par la charge. Ce dispositif présente donc l'avantage de ne pas nécessiter de dispositif de limitation du courant. Par ailleurs, et toujours en raison du temps de commutation faible, la tension aux bornes de l'actionneur 12 ne peut pas devenir supérieure à celle du condensateur C_1 réservoir, ni devenir

- 5 négative. Un moyen supplémentaire pour limiter la tension aux bornes de l'actionneur 12 n'est donc pas nécessaire.

Pour obtenir un effet survolteur, et par suite une récupération d'énergie, il est nécessaire que la résistance R_0 présente une faible valeur. Cette résistance
10 R_0 correspond alors aux pertes de l'inductance L_1 .

La charge commutée q_c ou bien q_d est néanmoins dépendante de la différence de potentiel entre l'actionneur 12 piézoélectrique d'une part, et le condensateur réservoir C_1 (à la charge) ou la masse (à la décharge) d'autre part. Cette non -
15 linéarité est susceptible d'affecter les performances du contrôleur 26. Il est particulièrement avantageux de moduler la largeur des commutations pour transférer une même quantité de charge à chaque commutation. A cet effet, le diviseur résistif R_1 , R_2 pour la lecture de la tension aux bornes de l'actionneur 12, est utilisé pour commander la largeur des commutations. Un exemple
20 d'évolution des durées de commutation, de façon à ce que les quantités de charge q_c et q_d deviennent constantes, est illustré sur les figures 5 et 6, respectivement pour la charge et pour la décharge.

Les moyens de correction VC1 et VC2 suivent respectivement l'évolution
25 des graphes présentés sur les figures 5 et 6. Ainsi, la modulation de la largeur des commutations en fonction du moyen de lecture de tension permet d'obtenir une résolution de positionnement identique sur toute la plage des tensions de fonctionnement. Il en résulte une amélioration de la précision de positionnement de l'actionneur 12.

30

Le diviseur résistif R_1 , R_2 constituant le moyen de lecture de la tension aux bornes de l'actionneur 12 peut bien entendu être remplacé pas un capteur de déplacement ou de déformation, sans remettre en cause le principe du

- 5 moyen de contrôle, et permettre ainsi de supprimer l'hystérésis de l'actionneur 12 piézoélectrique.

Pour aboutir au circuit décrit sur la figure 2, il est nécessaire de connecter les masses de l'actionneur 12 et de la source E1 de tension continue.

10

Dans d'autres circonstances, on peut être intéressé à préférer la stabilité en position de l'actionneur 12 à l'effet de récupération d'énergie. En effet, la stabilité en position peut parfois poser un problème, notamment quand l'actionneur 12 piézoélectrique est surtendu, parce que sa tension est
15 augmentée ou réduite de manière indicielle à chaque commutation, comme cela a été montré sur les figures 4.a et 4.b. L'actionneur 12 oscille sur sa période propre à chaque commutation, conduisant dans certaines applications à une stabilité en position insuffisante. Il est alors judicieux d'amortir l'actionneur électriquement, notamment au moyen d'un circuit électrique amorti,
20 de fréquence de résonance proche de la fréquence de résonance mécanique de l'actionneur 12. Il suffit de choisir convenablement les valeurs de l'inductance L_1 et de la résistance R_0 , de façon à ce que :

- le circuit L_1 , R_0 , et la capacité de l'actionneur 12 présente une fréquence de résonance proche de la fréquence de résonance f_n de
25 l'actionneur,
- la résistance R_0 présente une valeur optimale pour réduire de façon optimale le facteur de surtension apparent de l'actionneur 12 piézoélectrique.

Lorsque l'actionneur 12 est bien couplé électriquement, il est possible
30 d'obtenir des facteurs de surtension apparent de l'ordre de 10. Il s'ensuit une bonne stabilité en position de l'actionneur 12 lorsqu'il est alimenté par le dispositif électronique 10 précité.

5 En référence à la variante du dispositif 100 de la figure 7, les mêmes numéros de repères seront utilisés pour désigner des composants similaires à ceux de la figure 1. L'inductance L_1 est connectée entre le point milieu 16 du diviseur capacif et la résistance R_0 pour :

- éviter que l'inductance L_1 intervienne lorsque le sélecteur S_3 est fermé,
- 10 - et placer la résistance R_0 en série avec la capacité de l'actionneur 12.

L'actionneur 12 piézoélectrique est alors alimenté en série avec la résistance R_0 . Le fonctionnement est globalement identique à celui décrit sur les figures 3.a à 3.d. Cependant, l'effet de récupération d'énergie n'est plus possible, parce que l'effet survolteur apparaissant à la fin d'une commutation de
15 décharge n'est pas possible sans l'inductance L_1 . Cette topologie présente l'avantage de présenter un comportement plus linéaire que la précédente. Les circuits de linéarisation des charges commutées VC1 et VC2 ne sont donc pas forcément nécessaires. Les bascules monostables MM1 et MM2 peuvent donc
20 avoir des durées fixes. Cette topologie permet donc d'aboutir à un premier moyen de contrôle moins onéreux.

Le choix de la valeur de la résistance R_0 permet d'amortir électriquement l'actionneur 12. La valeur optimale de R_0 est telle que la fréquence de coupure
25 du filtre constitué par la capacité de l'actionneur 12 et la résistance R_0 soit proche de la fréquence mécanique de l'actionneur 12. Lorsque l'actionneur est bien couplé électriquement, il est possible d'obtenir des facteurs de surtension apparente inférieurs à 20. Il s'ensuit une bonne stabilité en position de l'actionneur lorsqu'il est alimenté par le dispositif électronique 100.

30

En référence à la figure 9, une autre réalisation du premier moyen de contrôle MC1 est présentée. Les mêmes numéros de repères seront utilisés pour désigner des composants identiques ou similaires. Dans certains cas, les

5 processus de charge et de décharge sont fortement dissymétriques, conduisant à quelques difficultés dans la réalisation du contrôleur. Alternativement, il est possible de doter le moyen de contrôle de deux contrôleurs 26A, 26B, l'un dédié au processus de charge de l'actionneur 12, l'autre dédié au processus de décharge de l'actionneur 12. Ainsi, le caractère dissymétrique est corrigé en
10 affectant des gains différents aux contrôleurs 26A et 26B.

En référence à la variante du dispositif 200 de la figure 8, les mêmes numéros de repères seront utilisés pour désigner des composants similaires à ceux de la figure 1. Le demi-pont DP est connecté entre le potentiel positif V_c
15 fourni par la première source de tension E1, et le potentiel négatif $-V_{c2}$ fourni par une deuxième source de tension E2.. Il est alors possible d'appliquer à l'actionneur piézoélectrique 12 une tension négative pouvant aller jusqu'à la valeur $-V_{c2}$, les processus de commutation de demi-pont DP et les moyens de contrôle MC1 et MC2 restant globalement identiques.

20

Le deuxième moyen de contrôle MC2 décrit sur la figure 10, pilote les deux interrupteurs S_1 , S_2 de façon à générer aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique, une tension sinusoïdale proche de la fréquence de résonance de l'actionneur. Une technique d'échantillonnage PWM à modulation de largeur
25 d'impulsions est avantageusement utilisée, en se basant sur un échantillonnage avec un indice de modulation élevée en boucle ouverte ou bien fermée. L'inductance L_1 du circuit de charge a un double rôle dans ce type de fonctionnement :

- elle permet de lisser les commutations en évitant des surintensités de
30 courant aux commutations,
- elle permet d'obtenir une phase adéquate entre la sinusoïde de référence et la sinusoïde apparaissant aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique, pour permettre le fonctionnement d'une boucle à verrouillage de phase utilisant ces deux grandeurs.

5

En référence à la figure 10, le second moyen de contrôle MC2 comprend :

- un dispositif 124 fournissant un signal de décalage pouvant être utilisé pour commander la fréquence d'un convertisseur tension/fréquence VCO,
- un sommateur 122 faisant la somme du signal de décalage et d'un signal
10 issu d'un filtre 123, et pilotant la fréquence du convertisseur tension/fréquence VCO, lequel fournit un signal sinusoïdal ,
- un circuit d'échantillonnage 125 délivrant un signal d'échantillonnage préféablement à haute fréquence,
- un comparateur 127 comparant les signaux issus du convertisseur VCO
15 et du signal d'échantillonnage permettant d'obtenir un échantillonnage PWM à modulation de largeur d'impulsions,
- un inverseur N et un dispositif de retards inter-voies RIV permettant d'éviter la conduction simultanée des interrupteurs S1 et S2,
- et un comparateur de phase 121 utilisant le signal de référence issu du
20 convertisseur VCO, et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique.

Les commutations successives des interrupteurs S_1 et S_2 permettent d'exciter la charge avec un signal sinusoïdal. A cause de l'inductance L_1 , une
25 différence de phase apparaît entre le signal de référence et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur. Cette différence de phase peut être mise à profit pour mettre en œuvre la boucle à verrouillage de phase PLL.

La figure 12 montre un exemple d'évolution de cette différence de phase en fonction de la valeur de l'inductance L_1 . La fréquence de résonance est modifiée quand la fréquence de résonance électrique du circuit formé par l'inductance L_1 , et la capacité de l'actionneur 12 est proche de la fréquence de résonance mécanique. Un effet survolteur apparaît dans ces conditions.

Lorsque l'inductance L_1 est choisie telle que la fréquence de résonance
35 électrique est inférieure à la fréquence de résonance mécanique, une différence de phase de 90° apparaît entre la tension de référence et la tension aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique. Dans ces conditions, l'actionneur est alors excité au voisinage de sa fréquence de résonance, lorsque la boucle à verrouillage de phase PLL, munie d'un gain et d'une fréquence de coupure du
40 filtre adéquats, est mise en œuvre.

5

Un réseau déphaseur 129 peut être inséré en aval de l'amplificateur opérationnel 18 constituant le moyen de lecture de la tension de l'actionneur 12 piézoélectrique. La présence du réseau déphaseur 129 permet à la boucle à verrouillage de phase PLL de converger vers une fréquence supérieure à la fréquence de résonance.

10

Le circuit de contrôle MC2 de la figure 10 utilise un circuit 127 conduisant à une technique d'échantillonnage PWM à modulation de largeur d'impulsions en boucle dite ouverte.

15

En référence à la figure 11, le deuxième moyen de contrôle MC2 comporte :

- un dispositif 124 fournissant un signal de décalage de tension pouvant être utilisé pour commander la fréquence du convertisseur tension/fréquence VCO,
- un premier sommateur 122 faisant la somme du signal de décalage de tension issu du dispositif 124, et d'un signal issu d'un filtre 123, et pilotant la fréquence du convertisseur tension/fréquence VCO, lequel fournit un signal sinusoïdal,
- un moyen de génération d'un signal de décalage de tension continue 131,
- un déphaseur 133 de valeur 90° inséré en aval du moyen de lecture à amplificateur opérationnel 18,
- un deuxième sommateur 130 permettant l'ajout d'un signal de décalage au signal sinusoïdal issu du convertisseur tension/fréquence VCO,
- un comparateur à hystérésis 132 comparant les signaux issus du convertisseur tension/fréquence VCO, et du déphaseur 133,
- un inverseur N et un dispositif de retards inter-voies RIV destinés à éviter la conduction simultanée des interrupteurs S_1 , S_2 ,
- et comparateur de phase 121 utilisant le signal de référence issu du convertisseur tension/fréquence VCO, et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur 12 piézoélectrique.

30

Dans cette variante du deuxième moyen de contrôle MC2, le comparateur 132 effectue une modulation delta en boucle fermée. L'actionneur 12

40

- 5 piézoélectrique est ainsi alimenté avec un décalage de tension continue, évitant de ce fait sa dépolarisation.

Lorsque l'actionneur 12 piézoélectrique est alimenté avec le second moyen de contrôle MC2, il est nécessaire de connecter l'actionneur 12 au point milieu du diviseur capacitif C_1 et C_2 avec un niveau de tension adéquat. En effet, à cause de l'effet surtension apparaissant à la résonance de l'actionneur, les niveaux de la source E_1 nécessaires pour les moyens de contrôle MC1 et MC2, sont en général différents.

- 15 Le dispositif électronique a été décrit au travers de quelques exemples non limitatifs. En particulier, la mise en œuvre des moyens de contrôle MC1 et MC2 peut être faite de manière analogique ou bien numérique. Il est également clair que le principe s'étend aisément à un dispositif électronique susceptible d'alimenter par exemple deux actionneurs piézoélectriques avec une différence
- 20 de phase appropriée suivant l'application.

5

REVENDECATIONS

1. Dispositif électronique permettant l'alimentation et le contrôle d'un
10 actionneur piézoélectrique (12) à l'aide d'une tension continue ou
quasistatique, ou d'une tension sinusoïdale de fréquence voisine de la
fréquence de résonance, ledit dispositif comprenant :
- une première source de tension (E1) continue bidirectionnelle connectée
à deux condensateurs (C_1 , C_2) formant un diviseur capacitif,
 - 15 - un demi - pont (DP) de puissance formé par deux interrupteurs (S_1 , S_2)
commandés, associées à deux diodes (D_1 , D_2) de roue libre,
 - un circuit de charge alimenté par ledit demi-pont (DP), et comprenant une
inductance (L_1) connectée électriquement avec l'actionneur (12),
 - et un moyen de lecture de l'état de l'actionneur (12) piézoélectrique,
 - 20 caractérisé en ce que les interrupteurs (S_1 , S_2) dudit demi-pont (DP) de
puissance sont pilotés alternativement par deux moyens de contrôle (MC1,
MC2) autorisant deux modes de fonctionnement distincts , dans lesquels :
 - le premier moyen de contrôle (MC1) est destiné à fournir ladite tension
continue ou quasistatique et régulée à l'actionneur (12) piézoélectrique,
 - 25 - le second moyen de contrôle (MC2) est susceptible de délivrer une
tension sinusoïdale à l'actionneur (12) avec une fréquence proche de la
fréquence de résonance,
 - un sélecteur (S_3) susceptible d'occuper une première position ou une
deuxième position pour connecter l'actionneur (12) piézoélectrique soit à
30 la masse de la première source de tension (E1), soit au point milieu (16)
du diviseur capacitif, respectivement dans l'un ou l'autre mode de
fonctionnement déterminé par le premier moyen de contrôle (MC1), ou le
second moyen de contrôle (MC2).

5

2. Dispositif électronique suivant la revendication 1 caractérisé en ce que le demi-pont (DP) est connecté au diviseur capacitif et à une deuxième source de tension (E2) ayant une polarité inverse de celle de la première source de tension (E1).

10

3. Dispositif électronique suivant la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'inductance (L_1) est connectée électriquement en série avec l'actionneur (12) entre le point milieu (14) du demi - pont (DP), et le point milieu (16) d'interconnexion des condensateurs (C_1 , C_2) du diviseur capacitif.

20

4. Dispositif électronique suivant la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'inductance (L_1) est connectée entre le point milieu (16) d'interconnexion des condensateurs (C_1 , C_2) du diviseur capacitif, et le sélecteur (S_3), l'inductance (L_1) se trouvant court-circuitée lorsque le sélecteur (S_3) est dans la première position, et la résistance (R_0) étant en série avec l'actionneur (12).

25

5. Dispositif électronique suivant la revendication 1 caractérisé en ce que le premier moyen de contrôle (MC1) comporte :
- un amplificateur différentiel (22) délivrant un signal d'erreur entre un signal de consigne délivré par un circuit de référence (24), et un signal de mesure représentatif de la tension de l'actionneur (12),
 - un convertisseur tension-fréquence (VFC) et un moyen de détection (28) du signe de l'erreur autorisant l'activation de deux bascules monostables (MM_1 et MM_2) commandant respectivement les interrupteurs (S_1 , S_2) de charge et de décharge,

30

- 5 - et un moyen permettant de régler la largeur des signaux de sortie des bascules monostables (MM_1 et MM_2) en fonction de la tension aux bornes de l'actionneur (12), de façon à linéariser le processus de commutation des charges.
- 10
6. Dispositif électronique suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le second moyen de contrôle (MC2) comporte :
- 15 - un circuit d'échantillonnage (125) délivrant un signal d'échantillonnage à haute fréquence,
- 15 - un comparateur (127) comparant les signaux issus du circuit d'échantillonnage (125) et d'un convertisseur tension /fréquence (VCO) connecté à la sortie d'un amplificateur différentiel (122),
- 20 - et une boucle à verrouillage de phase (PLL) semi - numérique utilisant le signal sinusoïdal de référence issu du convertisseur (VCO), et la tension apparaissant aux bornes de l'actionneur (12) piézoélectrique.
- 25
7. Dispositif électronique selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que l'inductance (L_1) et/ou la résistance de décharge (R_0) sont choisies
- 25 pour amortir électriquement l'actionneur (12) piézoélectrique avec une réponse impulsionnelle amortie permettant d'obtenir une meilleure stabilité en position.
- 30
8. Dispositif électronique suivant l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la source de tension (E1) continue est formée par un hâcheur DC/DC à niveau commandable.

- 5 9. Dispositif électronique suivant la revendication 6 ou 7, caractérisé en ce qu'
en présence d'une différence de phase de 90° apparaissant entre la tension
de référence issue du convertisseur (VCO) et la tension aux bornes de
l'actionneur (12), l'inductance (L_1) coopère avec la boucle à verrouillage de
phase (PLL) pour la solliciter vers la fréquence de résonance de
10 l'actionneur.
10. Dispositif électronique suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le
deuxième moyen de contrôle (MC2) comporte :
- 15 - un comparateur à hystérésis (132) destiné à comparer les signaux issus
d'un convertisseur tension /fréquence (VCO), et du moyen de lecture (18)
de la tension de l'actionneur (12),
- une boucle à verrouillage de phase (PLL) semi - numérique utilisant le
signal sinusoïdal de référence issu du convertisseur (VCO), et la tension
20 apparaissant aux bornes de l'actionneur (12) piézoélectrique.
11. Dispositif électronique suivant la revendication 6 ou 10, caractérisé en ce
qu'un réseau déphaseur (129) est inséré entre le moyen de lecture de la
25 tension aux bornes de l'actionneur (12), une différence de phase de 90°
apparaissant entre la tension de référence issue du convertisseur (VCO) et
la tension issue du réseau déphaseur (129), permettant à la boucle à
verrouillage de phase (PLL) de converger vers la fréquence de résonance
de l'actionneur.

30

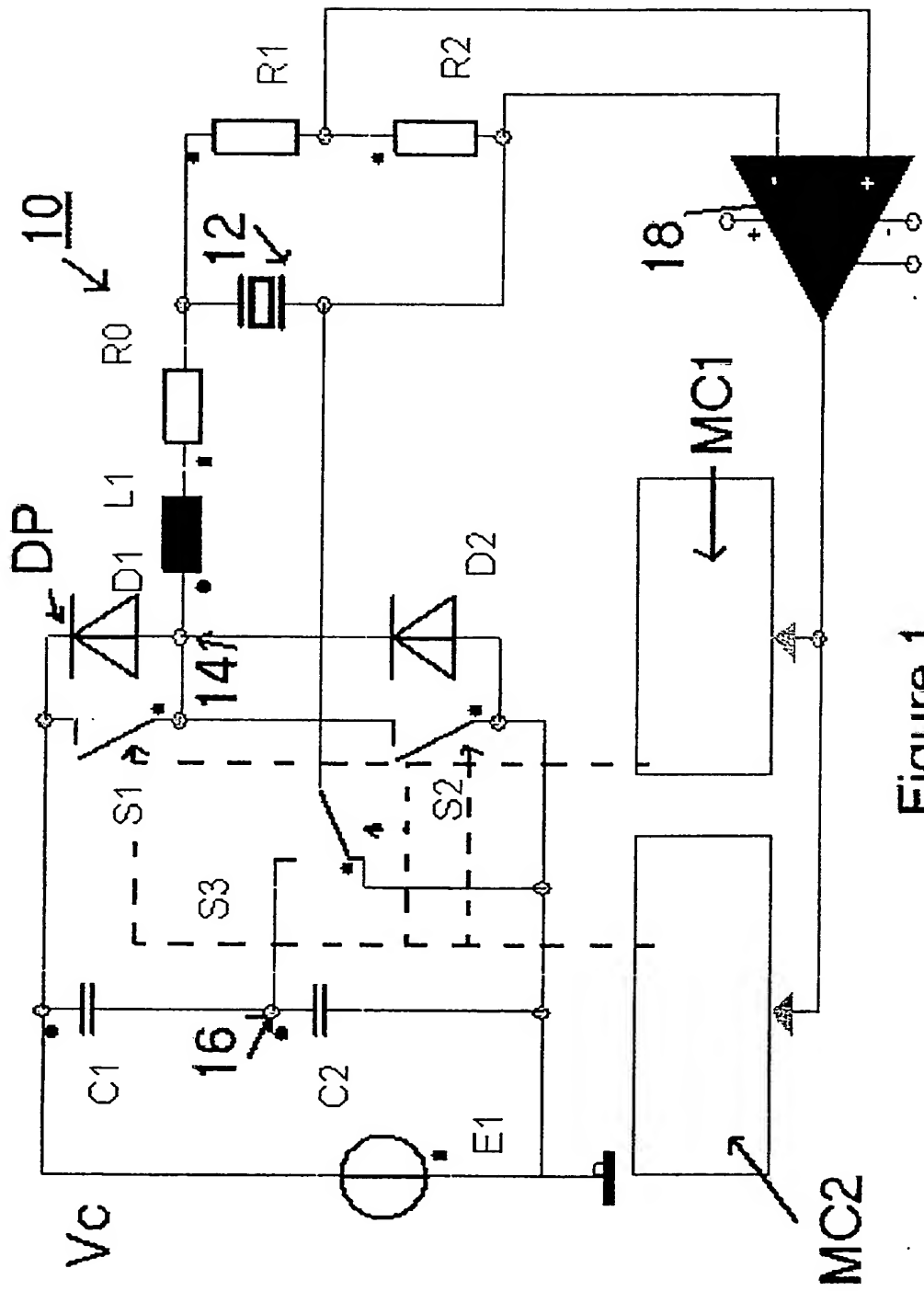


Figure 1

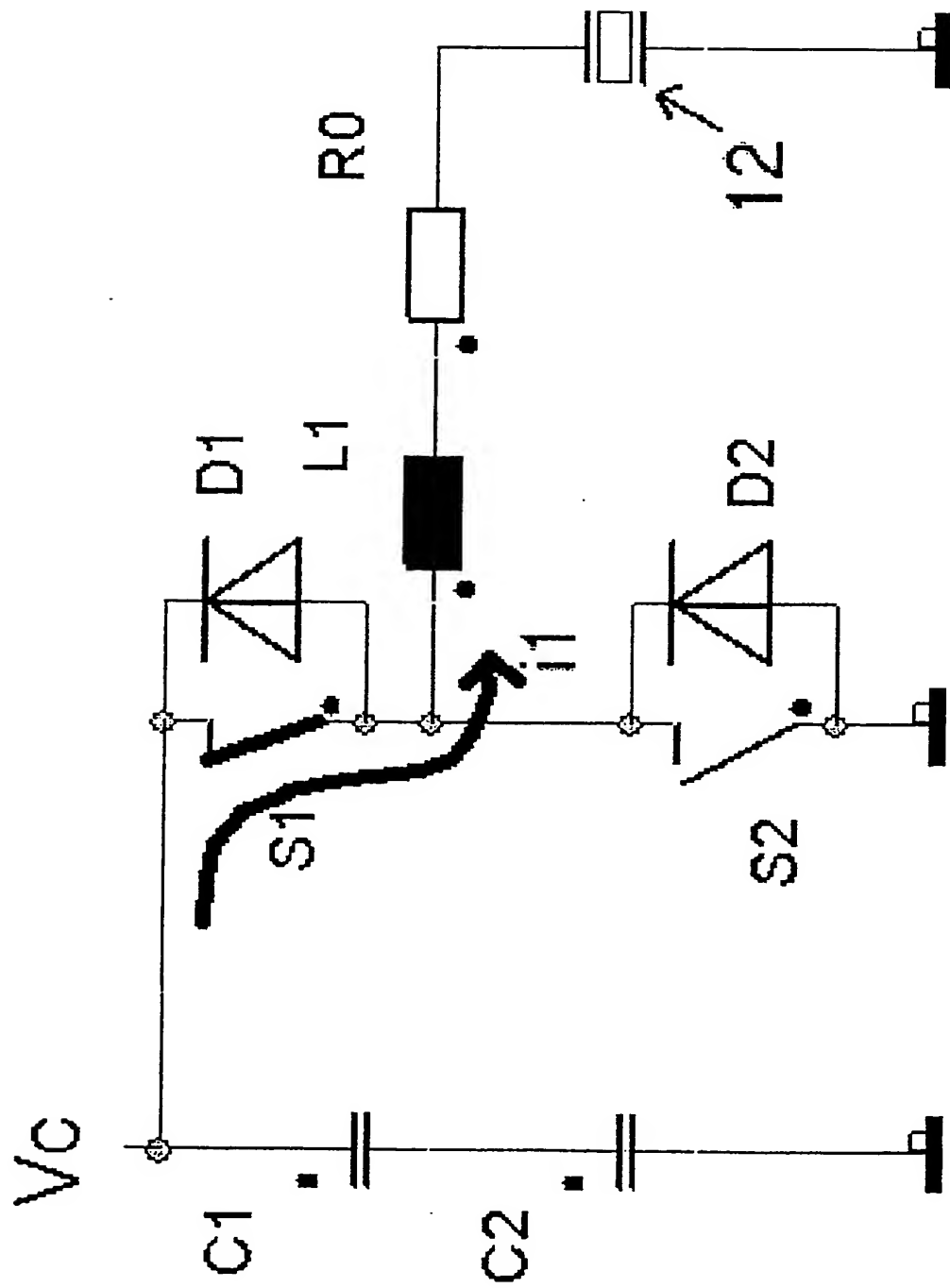


Figure 3a

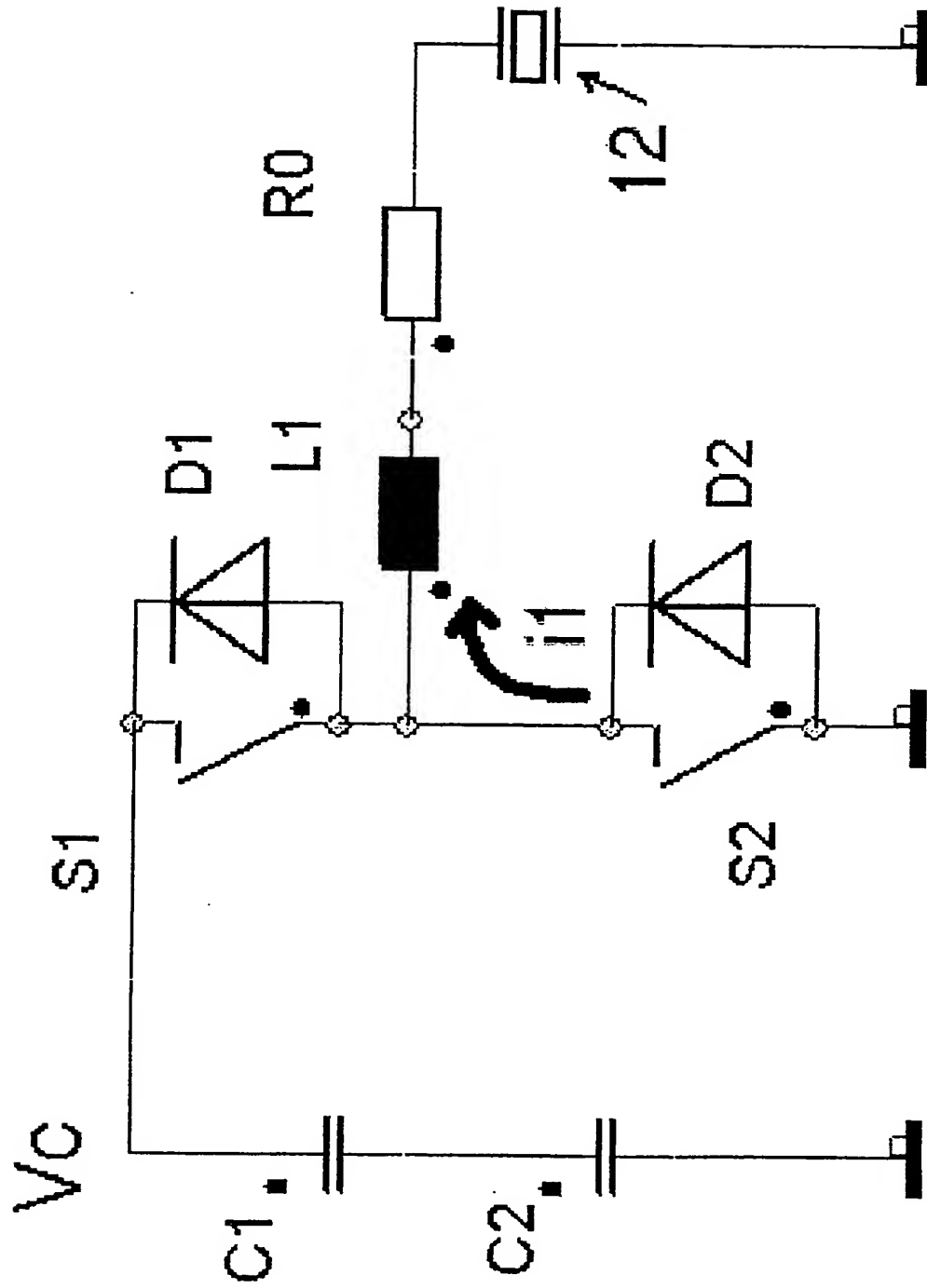


Figure 3b

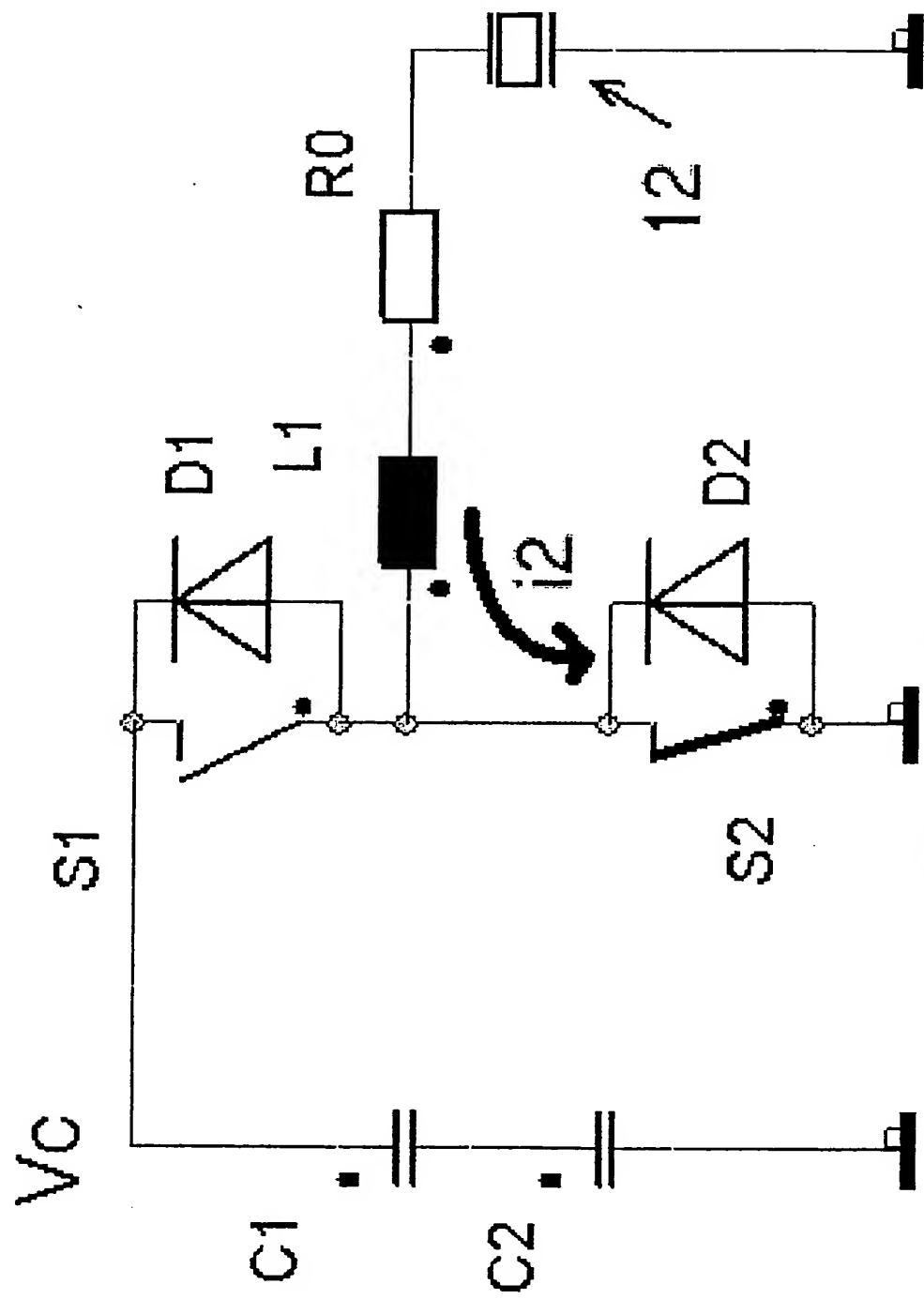


Figure 3c

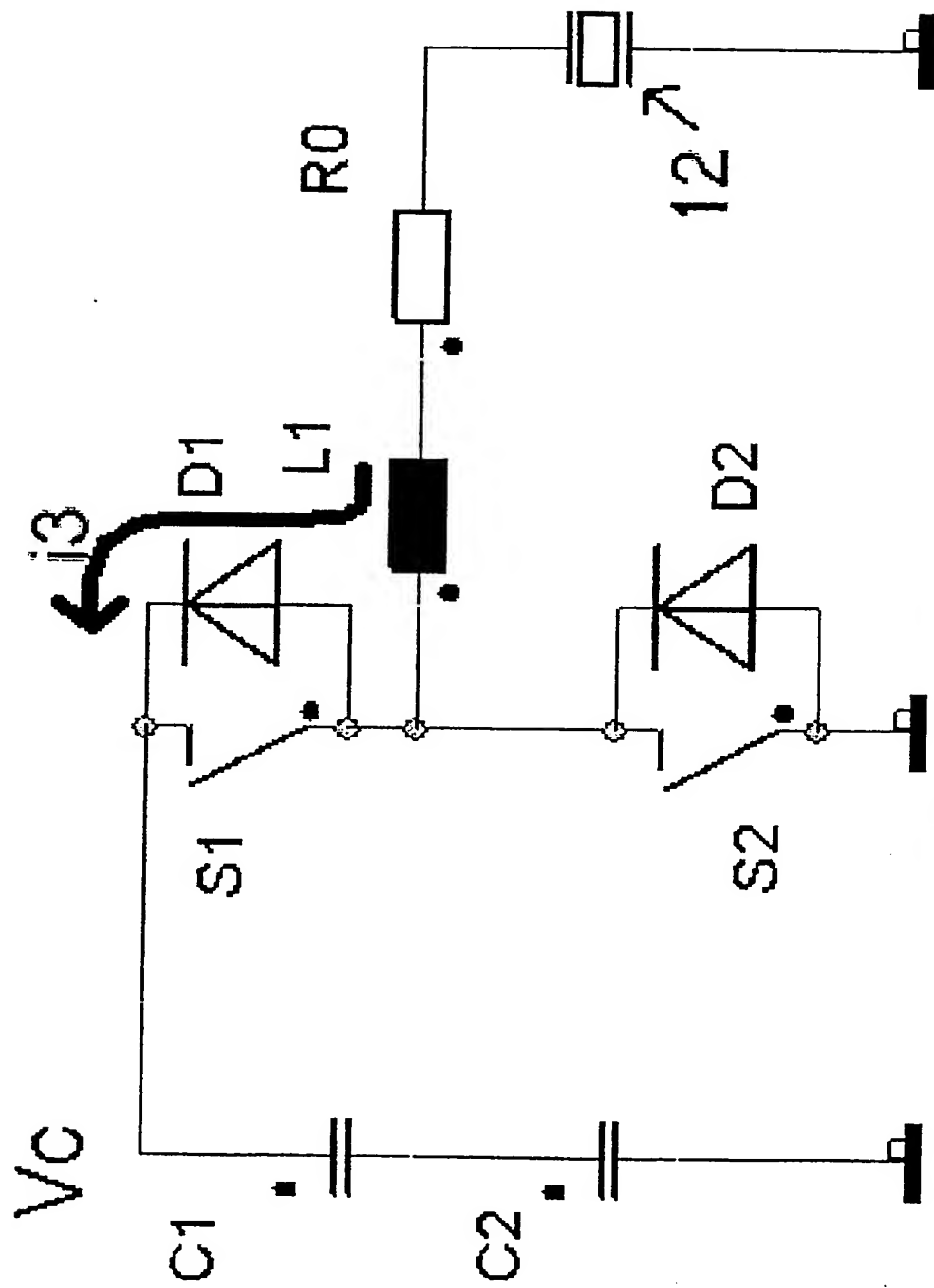


Figure 3d

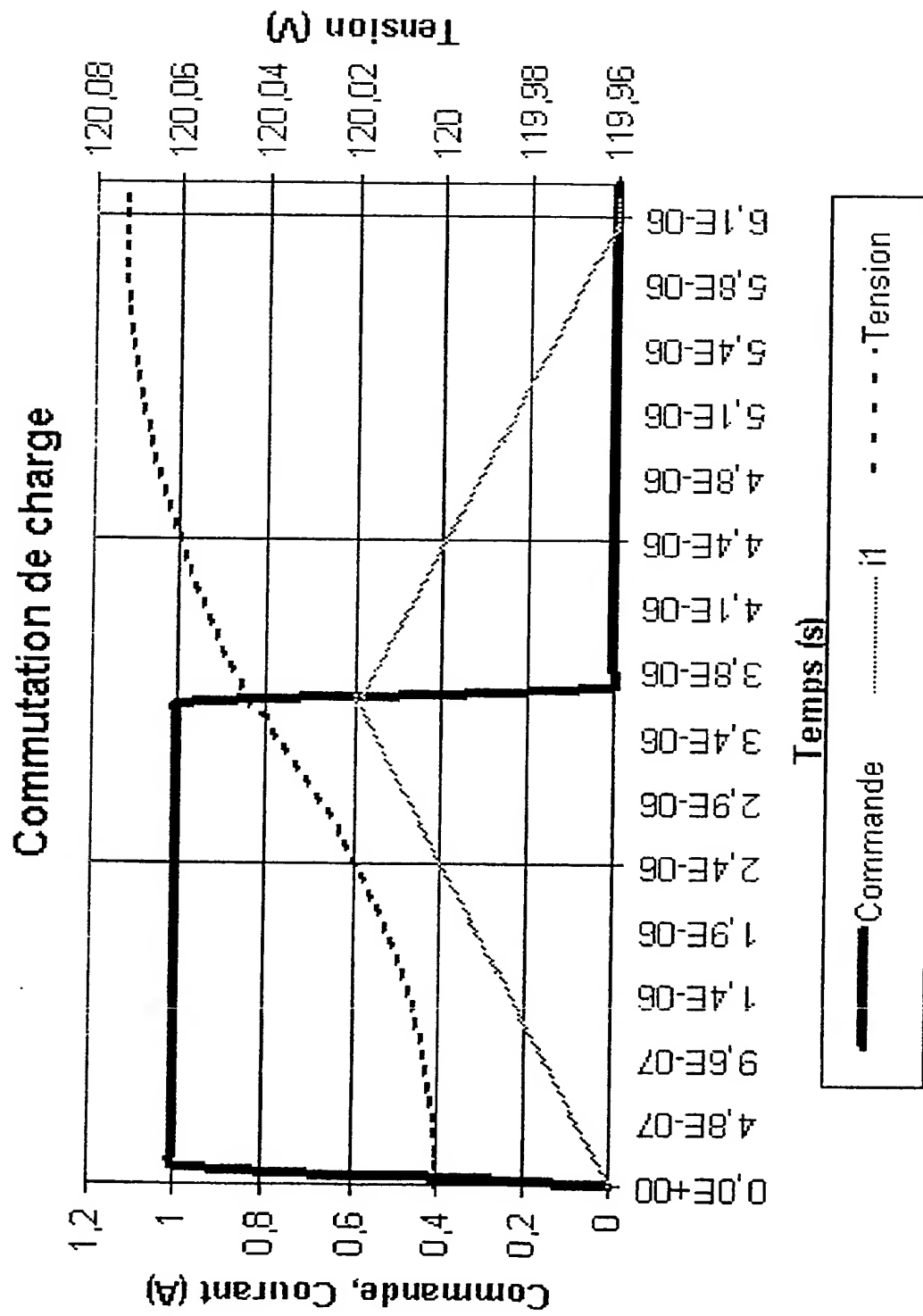


Figure 4a

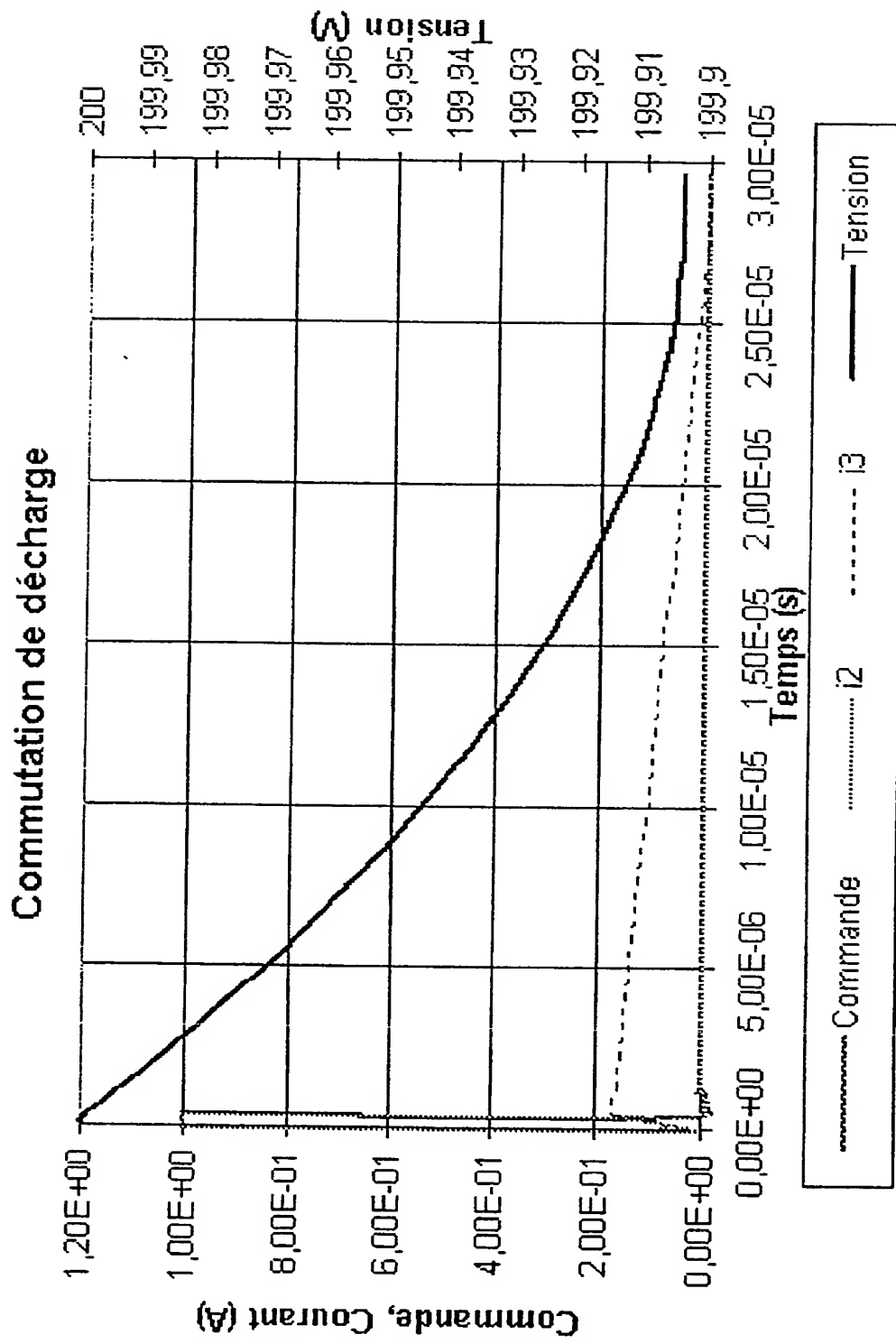


Figure 4b

Evolution de la durée de la commutation en fonction de la tension
aux bornes de (12) pendant la charge de (12)

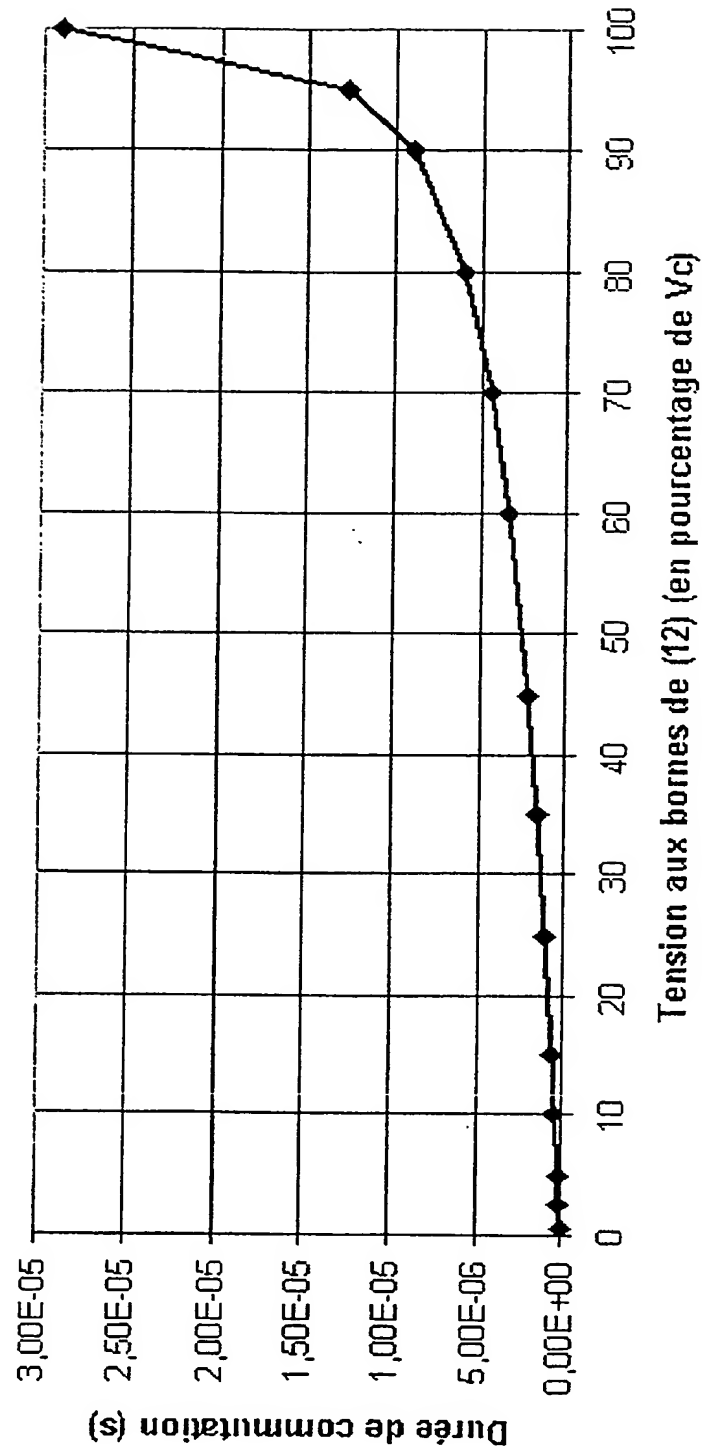


Figure 5

Evolution de la durée de la commutation en fonction de la tension
aux bornes de (12) pendant la décharge de (12)

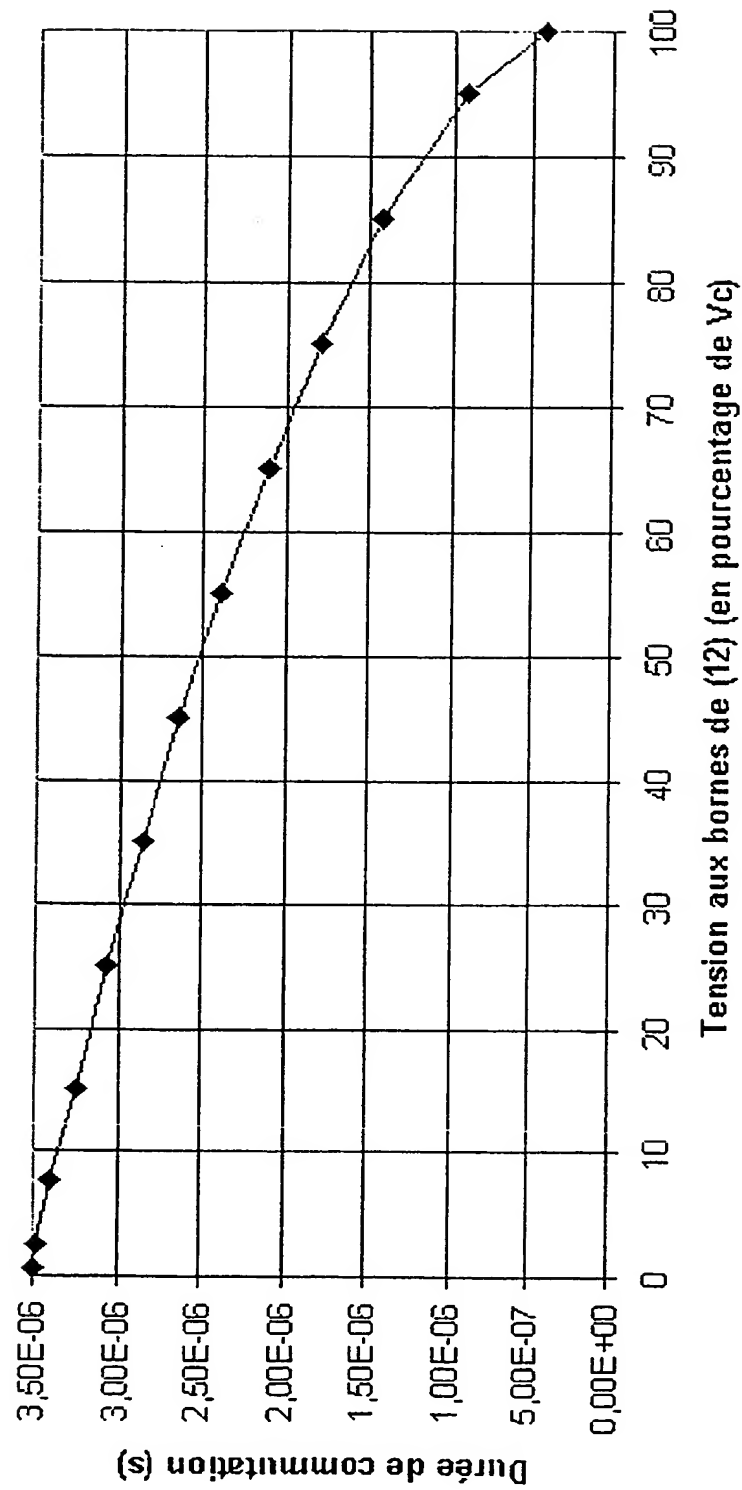


Figure 6

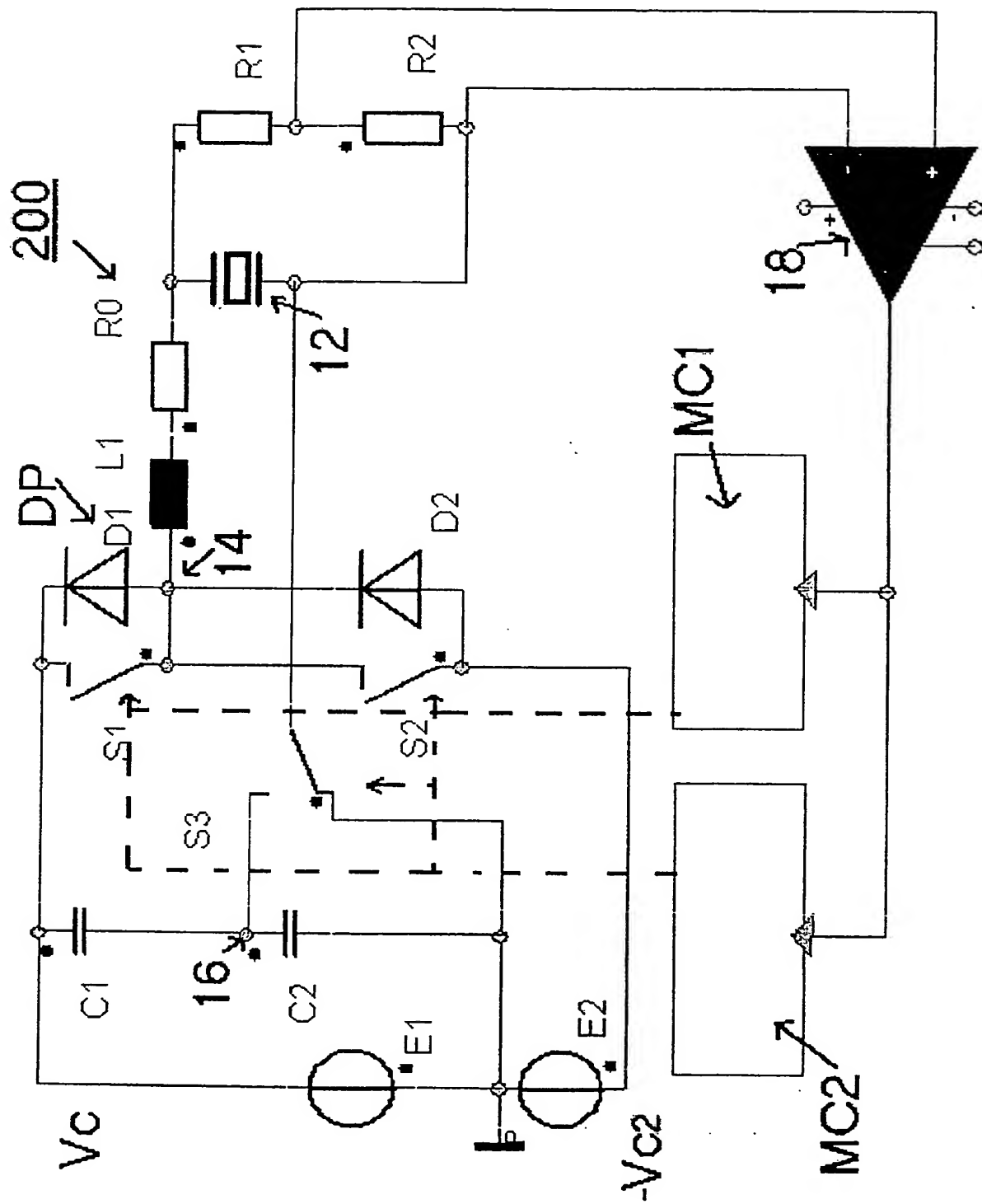


Figure 8

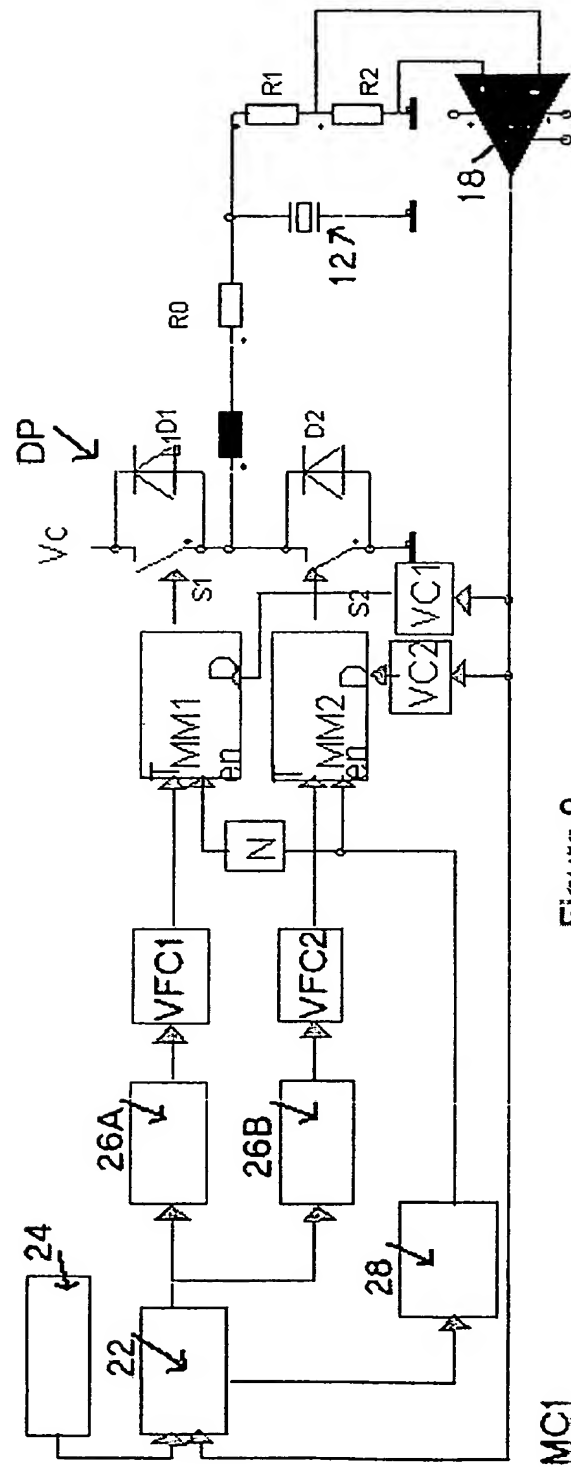


Figure 9

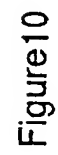


Figure 10

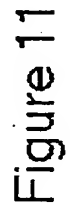


Figure 11

Evolution de la tension aux bornes de l'actionneur 12 en fonction de l'inductance L1

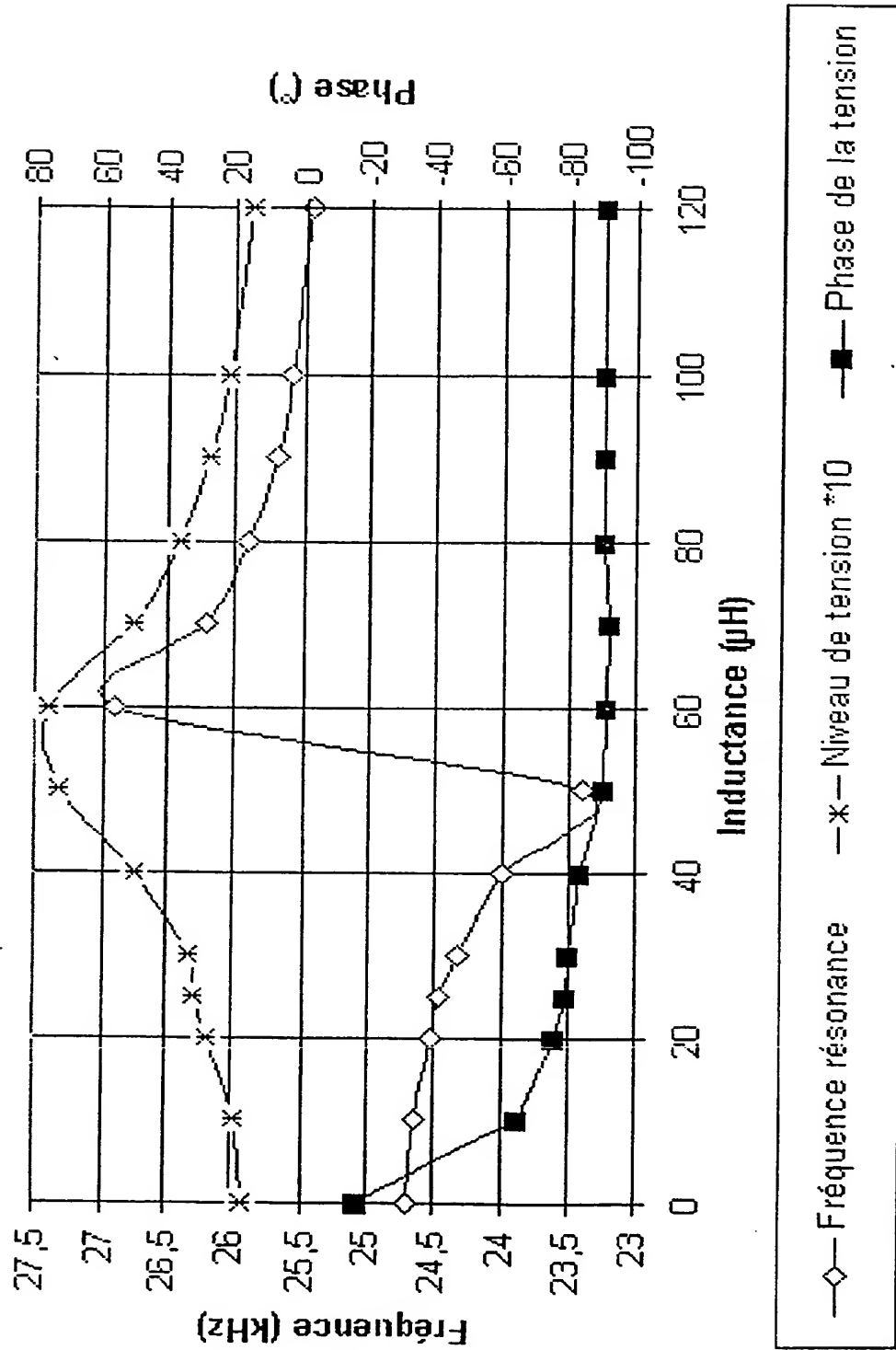


Figure 12

REPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
de la
PROPRIETE INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE
PRELIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

2793598
N° d'enregistrement
national

FA 576663
FR 9906239

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
D,A	EP 0 313 072 A (HITACHI LTD) 26 avril 1989 (1989-04-26) * colonne 7, ligne 36 - colonne 8, ligne 29; figure 14 * -----	1
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.7)
		H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
6 janvier 2000		Pelsers, L
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>		

1
EPO FORM 1503 03.82 (P04C13)